

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кропотиной Юлии Андреевны
**“Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в
многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного
ветра”**, представленную на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная
астрономия

Диссертация Кропотиной Юлии Андреевны “Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн в многокомпонентной плазме остатков сверхновых, скоплений галактик и солнечного ветра” посвящена моделированию структуры бесстолкновительных ударных волн, а также исследованию процессов ускорения частиц в них. Бесстолкновительные ударные волны это часто встречающееся в астрофизике явление, возникающее в низкоплотной плазме, когда длина свободного пробега частиц превышает характерный масштаб волны, на котором резко меняются параметры плазмы – плотность, температура, электромагнитное поле и др. Наибольший интерес эти волны представляют в остатках сверхновых и в магнитосфере Земли, что как раз рассматривается в представленной работе.

Актуальность исследований структуры бесстолкновительных ударных волн в плазме, связана с тем, что эта структура не изучена до конца и определяется множеством физических процессов в плазме. Из-за малого количества столкновений внутри фронта такой волны основную роль играют коллективные процессы и взаимодействие частиц через электромагнитное поле. Диссипация энергии, которая определяет скачок параметров плазмы в волне, может быть, в зависимости от параметров волны, связана с затуханием Ландау или различными плазменными неустойчивостями. Исследование таких процессов представляет большой интерес в настоящее время. Их сложность и нелинейность приводит к тому, что детальная структура бесстолкновительной ударной волны может быть получена только в результате численного моделирования, чему и посвящена данная работа.

Следует отметить, что представленная в диссертации модель позволяет рассматривать структуру бесстолкновительных волн в плазме содержащей ионы разного типа (многокомпонентной), что представляет особый интерес, так как многие работы по плазменным эффектам ограничиваются однокомпонентной средой.

Большая часть диссертации посвящена вопросам ускорения космических лучей в остатках сверхновых. Такие лучи детектируются на Земле, а также вносят вклад в свечение остатков в высокоэнергетическом диапазоне. Изучение механизмов их генерации позволит, с одной стороны, понять физические процессы, происходящие в подобных объектах, с другой стороны, усовершенствовать методы наблюдения объектов во Вселенной.

Кроме этого, бесстолкновительные ударные волны присутствуют в магнитосфере Земли и дают вклад в формирование космической погоды в окрестности Земли, что играет важную роль для функционирования спутниковой группировки, а также различных радиосистем на Земле.

Научная новизна исследования определяется использованием гибридной модели, позволяющей учитывать многокомпонентность плазмы, реализованной в численном коде, в разработке которого участвовал автор диссертации. Применение этого кода позволило получить новые результаты о влиянии тяжелой компоненты в плазме на ускорение частиц, определить пространственные границы применимости диффузионных полуэмпирических моделей при описании распределения

ускоренных частиц, предложить методику диагностики концентрации гелия в космической плазме, показать влияние надтепловых частиц на усиление тока во вращательном МГД разрыве, взаимодействующим с бесстолкновительной ударной волной в магнитосфере Земли.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертации результаты обогащают знания о процессе формирования космических лучей в остатках сверхновых. Влияние примеси тяжелых ионов на эффективность ускорения в бесстолкновительных ударных волнах и их структуру показывает важность учёта сложного состава плазмы в расчётах остатков. Работы по сравнению результатов гибридного моделирования и полуэмпирических моделей позволяют уточнить коэффициенты этих моделей, которые используются в полномасштабном гидродинамическом моделировании остатков сверхновых. Предложенная методика диагностики концентрации гелия в космической плазме может быть реализована на практике с использованием рентгеновских обсерваторий следующего поколения. Разработанная гибридная модель и код могут быть применены и к другим задачам, например, к исследованию эффектов в низкоплотной лазерной лабораторной плазме.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и списка литературы.

Во введении к диссертации раскрывается актуальность работы, формулируются цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость, перечисляются положения, выносимые на защиту. Также представлен обзор литературы по теме диссертации.

Первая глава посвящена описанию гибридного кода “Maximus”. Оно включает как изложение физической модели, её области применимости, так и численной схемы, которая реализована в коде. Описание схемы играет большую роль, так как численные коды с подобными физическими моделями являются довольно уникальными. В задачах с присутствием магнитного поля очень важно сохранить свойство его бездивергентности, что накладывает определённые требования на используемую численную схему. Также, в главе представлены результаты нескольких тестов, позволяющих провести валидацию кода. Тесты показали замечательное согласие расчётов по “Maximus” с аналитическими решениями и расчётами другого кода с иной физической моделью.

Вторая глава составляет основную часть диссертации, и в ней рассматриваются несколько задач, связанных с бесстолкновительными ударными волнами в остатках сверхновых.

В начале второй главы проводится исследование волны с параметрами, соответствующими возвратной ударной волне в остатке SN1987A. Моделирование проводилось для многокомпонентной плазмы, которая помимо ионов водорода содержала тяжелую примесь (кислород, серу, железо) с низкой степенью ионизации. Наблюдался интересный эффект преимущественного ускорения тяжёлых ионов и, наоборот, падения эффективности ускорения для ионов водорода, по сравнению с чисто водородной средой.

Далее во второй главе рассматривается влияние компоненты тяжелых ионов на структуру фронта бесстолкновительных ударных волн в плазме. Показано, что присутствие тяжелых ионов приводит к увеличению характерного времени перестройки фронта, что объясняется разницей порогов насыщения плазменных неустойчивостей.

Эти результаты показывают важность учёта многокомпонентности плазмы при исследовании бесстолкновительных ударных волн в остатках и ускорению частиц в них.

Следующая задача, рассмотренная во второй главе, связана с распространением бесстолкновительной волны в среде состоящей только из тяжелых элементов. Примером такой среды является остаток сверхновой типа Ia. Структура волны исследовалась при различных углах наклона магнитного поля к нормали фронта. Результаты показывают разницу в ускорении частиц между поперечным и продольным полем. Также наблюдалось более эффективное ускорение тяжелых частиц по сравнению с лёгкими (что согласуется с результатами ускорения в остатках, где доминирует водородная плазма, полученными ранее во второй главе).

Далее во второй главе рассматриваются известные полуэмпирические модели, которые позволя-

ют описать процесс ускорения частиц без учёта детальной структуры фронта. Эти модели предполагают пространственную диффузию функции распределения частиц и могут быть использованы в гидродинамических кодах. В диссертации рассматриваются две модели: бомовская и на основе квазилинейной теории Белла. Каждая из них имеет свое приближение для коэффициента диффузии. Сравнение расчётов по диффузионным моделям и коду “Maximus” позволяет определить область применимости этих моделей, что сделано в диссертации для разных частиц (протонов, тяжелых ионов). Нельзя не отметить замечательное согласие, которое наблюдается в соответствующих областях между расчётами по гибридной модели и полуэмпирическими диффузионными моделями.

Заканчивается вторая глава расчётами формирования надтепловых частиц в окрестности бесстолкновительной ударной волны в солнечном ветре. Параметры ветра взяты из базы данных наблюдений спутника ACE. Показано, что расчёты по гибридной модели и бомовской диффузии замечательным образом описывают пространственное распределение частиц с энергией около 100 кэВ перед фронтом волны. Этот результат в очередной раз показывает применимость гибридной модели для описания фронта бесстолкновительных ударных волн и ускорения частиц в нём.

В третьей главе рассматриваются ударные волны в скоплениях галактик и процесс ускорения высокозарядных ионов железа в таких волнах. В работе найдена корреляция между эффективностью ускорения ионов железа и концентрацией гелия в среде, что позволяет в будущем разработать методику определения плотности гелия по наблюдению спектральных линий железа.

В четвертой главе рассматривается взаимодействие вращательного разрыва с бесстолкновительной ударной волной на границе магнитосферы Земли. Показано усиление тока во вращательном разрыве, что связано в том числе с влиянием надтепловых частиц перед фронтом. В данной задаче рассмотрены как квазипоперечные, так и квазипродольные волны.

В заключении ещё раз сформулированы основные результаты работы.

К диссертационной работе Кропотиной Ю. А. следует сделать несколько замечаний:

1. Большая часть расчётов в диссертации (в остатках, в солнечном ветре, в скоплениях галактик) проводится в двумерном приближении: хотя поля и скорости имеют все 3 компоненты, волновые моды возмущений ограничены двумерным пространством. Так как структура бесстолкновительных ударных волн в расчётах связана с плазменными неустойчивостями, их развитие может быть модифицировано двумерным приближением. Эффект такого приближения никак не обсуждается в диссертации.
2. Расчёты проводятся при наличии искусственных отражающих граничных условий при $x = 0$, которые позволяют сформировать ударную волну, отражая поток падающей плазмы. В окрестности фронта бесстолкновительной ударной волны присутствует множество мод колебаний разных длин волн. В работе не рассматривается вопрос о влиянии отражающей стенки на эволюцию каких-нибудь мод в плазме и структуру ударной волны.
3. Применение гибридной модели ограничивает расчёты малыми временами (в несколько тысяч обратных ларморовских частот). В диссертации не раскрывается вопрос выхода на стационарные исследуемые характеристики плазмы (например, наблюдаемых спектров ионов и т.п.).
4. В диссертации не обсуждаются вопросы сходимости и точности расчётов, а также влияния начального распределения макрочастиц.

Указанные недостатки не умаляют качества работы. Диссертация является законченным самостоятельным исследованием. Основные результаты опубликованы в 9 статьях в реферируемых журналах, входящих в список ВАК, а также обсуждены на множестве конференций. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Работа удовлетворяет требованиям, установленным “Положением о порядке присуждения учёных степеней”, а её автор Кропотина Юлия

Андреевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.03.02 – “астрофизика и звёздная астрономия”.

Официальный оппонент
начальник лаборатории
ФГУП ВНИИА, к.ф.-м.н.

С.И. Глазырин

Подпись к.ф.-м.н. Глазырина С.И. заверяю:
Учёный секретарь НТС ФГУП ВНИИА,
к.т.н.

Л.В. Феоктистова

Глазырин Семен Игоревич, кандидат физико–математических наук, начальник лаборатории Федерального государственного унитарного предприятия “Всероссийского научно–исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова” (ФГУП ВНИИА).
Адрес: Россия, 127055, Москва, Сущевская ул., д. 22
Телефон: 8 (499) 978-41-85
E-mail: glazyrin@vniia.ru